

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

M. Dienel / D. Billep / W. Dötzel

Development of a drift compensated acceleration sensor array Entwicklung eines driftkompensierten Beschleunigungssensorarray

ABSTRACT

The paper deals with a novel approach for a 2D low-g acceleration MEMS-sensor-system [1] for inertial measurements to reduce errors using redundant sensor signals. This is achieved by arrangement of multiple acceleration sensors within an array on one chip, whereby their measurement directions are differently aligned. Hence; the acceleration in magnitude and direction is measurable in-plane. The usage of at least three sensors offers the possibility to correct a uniform time and temperature dependent offset drift on the resulting signal. The presented sensor system comprises six sensor elements. The calculation of mean values reduces random errors. To fulfil the requirements all sensor elements have the same inner structure concerning alignment to the crystal orientation of silicon. The complete sensor system is simulated using a reduced order model generated by FEM analysis. The freedom of the design parameters is given by a new MEMS technology.

EINFÜHRUNG

Zu den wichtigsten Produkten der Mikrosystemtechnik zählen Beschleunigungs- und Neigungssensoren. Ein besonders interessantes und herausforderndes Arbeitsgebiet stellt der Einsatz von Beschleunigungs- und Drehratesensoren zur inertialen Verfolgung bewegter Objekte dar. Diese so genannte inertialen Objektverfolgung beschreibt die Positions- und Orientierungsverfolgung von beliebigen beweglichen Körpern, auf denen die genannten Sensoren befestigt sind. Aus den aufgezeichneten Daten (Beschleunigung, Drehrate) können die Geschwindigkeit und die Position des Körpers berechnet werden. Mikromechanische Sensorsysteme bieten sich in besonderer Weise für diese Anwendung an. Sie sind sehr kompakt, besitzen keine Abschattungsbereiche, sind unabhängig von den Umgebungsbedingungen und beeinflussen den Messkörper nur in geringem Maße. Als problematisch hingegen erweisen sich schon sehr kleine Messfehler bei der Bestimmung der Beschleunigung, die zu quadratisch mit der Zeit wachsenden Positionsfehlern führen. Die Ursachen hierfür liegen bei Temperaturschwankung, Nichtlinearitäten des Messbereichs bzw. ein nicht optimal ausgenutzter Messbereich (Empfindlichkeit) und Alterung (z. B. Einflüsse durch das Packaging [2]). Mehrachsige Beschleunigungssensoren wurden in verschiedenen Varianten vorgestellt: zweiachsige [3] und dreiachsige Sensoren ([4],[5],[6]) mit seismischen Masseelementen sowie nach dem thermischen Prinzip arbeitende Sensoren ohne bewegliche Strukturen [7]. Hoch empfindliche einachsige Sensoren werden in [8] beschrieben, welche sich zu mehrachsigen Inertialmesssystemen

vervollständigen lassen.

Der hier vorgestellte Sensorarray besteht aus sechs Einzelsensoren, welche auf einem Chip integriert sind. Die wesentlichen Merkmale können wie folgt zusammengefasst werden.

1. Die Hauptdetektionsachsen der Einzelsensoren unterscheiden sich und sind nicht auf eine orthogonale Anordnung beschränkt. Dies gewährleistet eine verbesserte Empfindlichkeit auf beliebig in der Sensorebene einwirkende Beschleunigungen.
2. Das Design der Federelemente ist für alle Sensoren im Silizium gleich ausgerichtet. Dies gewährleistet eine einheitliche Federkonstante für jeden Sensor im anisotropen Silizium.
3. Das redundante Messen durch mehrere Sensoren ermöglicht zusätzlich einen ständigen Selbsttest [6], um Fehlfunktionen zu detektieren.

AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE

Der mikromechanische Beschleunigungssensor in der hier vorgestellten Variante besteht aus einer seismischen Masse, welche über eine Feder an einem Sensorrahmen aufgehängt wird. Einer Beschleunigung des Rahmens wirkt die Trägheit der seismischen Masse entgegen und diese wird gegenüber dem Rahmen ausgelenkt. Die Trägheitskraft wirkt am Schwerpunkt S der seismischen Masse. Die Auslenkung wird durch die Federelemente begrenzt. In Abbildung 1 sind die genannten Grundelemente eines Beschleunigungssensors wieder zu finden.

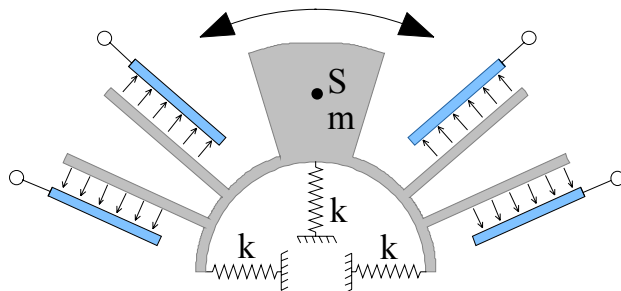


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Sensorprinzips (Struktur 1)

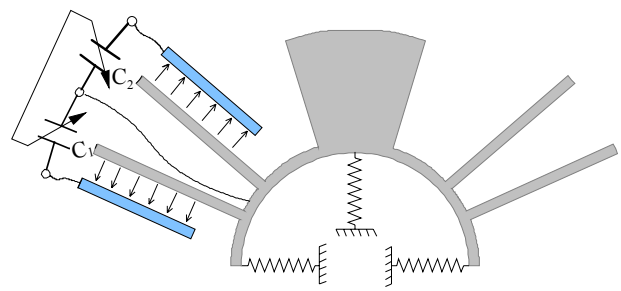


Abbildung 2 Differenzialkondensator zur Auswertung

Im Falle des hier vorgestellten Sensors besteht die seismische Masse aus einem Kreisringsegment ($\alpha = 36^\circ$). Diese Masse ist über drei mäanderförmigen Federn am Chiprahmen befestigt. Neben der Masse wird das Kreisringsegment mit vier Elektrodensegmenten zu einem halben, ringförmigen Segment vervollständigt. Hierbei bilden jeweils zwei Elektroden eine Differenzialkondensatoranordnung (Abbildung 2). Eine Auslenkung der seismischen Masse, bedingt durch eine Beschleunigung, führt zu einer Änderung der Differenzialkapazität.

Die beschriebenen Segmente (Masse, Kapazitätskämme) können gegeneinander im Designprozess

vertauscht werden, dies führt zu einer Verschiebung des Schwerpunkts, ohne hingegen die Orientierung der Feder innerhalb des einkristallinen und anisotropen Siliziumchips zu verändern (Abbildung 3 und 4).

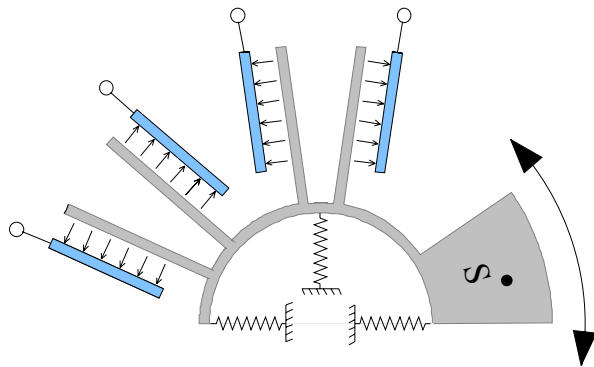


Abbildung 3 Sensorstruktur 3

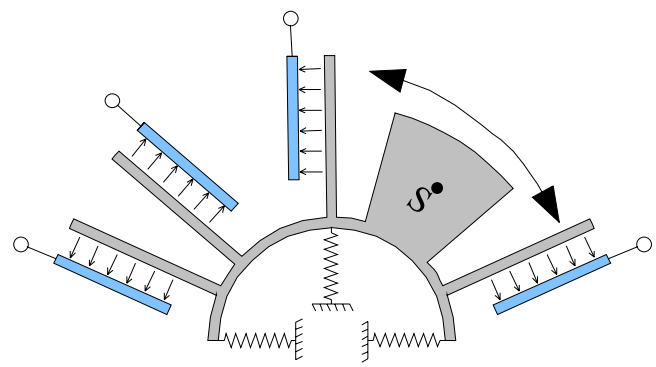


Abbildung 4 Sensorstruktur 2

Die so realisierbaren Sensorvarianten werden gemeinsam innerhalb eines Arrays auf einen Siliziumchip vereint (Abbildung 5).

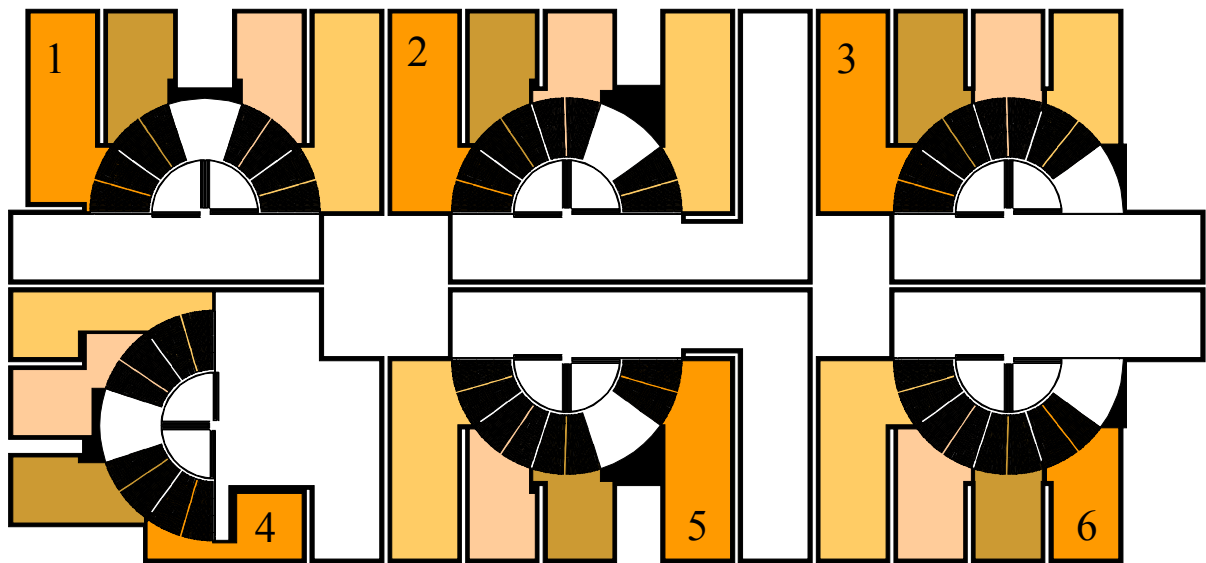


Abbildung 5 Maske des kompletten Sensorchips (mit Zuordnung der Sensornummer)

MODELLIERUNG UND SIMULATION

Eine komplette FEM-Simulation mit Feldkopplung des gesamten Chips gestaltet sich als sehr rechenintensiv. Aus diesem Grund werden die Sensoren jeweils einzeln in der FEM-Software Ansys modelliert und simuliert. Aus der Simulation werden alle notwendigen Parameter für ein reduziertes Modell im Netzwerksimulator entnommen, um das Verhalten des gesamten Chips zu berechnen, sowie eine durchgehende mechanische und elektrische Simulation durch zu führen.

Die Sensoren sind auf eine erste Eigenfrequenz von ca. 2 kHz ausgelegt. Diese Eigenfrequenz entspricht dem Rotationsmode um den Aufhängepunkt (vgl. Tabelle 1 und Abbildung 6). Der nächste Eigenmode liegt, auf Grund des hohen durch die Herstellungstechnologie [9] ermöglichten Aspektverhältnisses von 1:25, um Faktor vier höher. Eine Auflistung der ersten Eigenfrequenzen ist Tabelle 1 zu entnehmen. Die höheren Moden wurden für das reduzierte Simulationsmodell nicht beachtet.

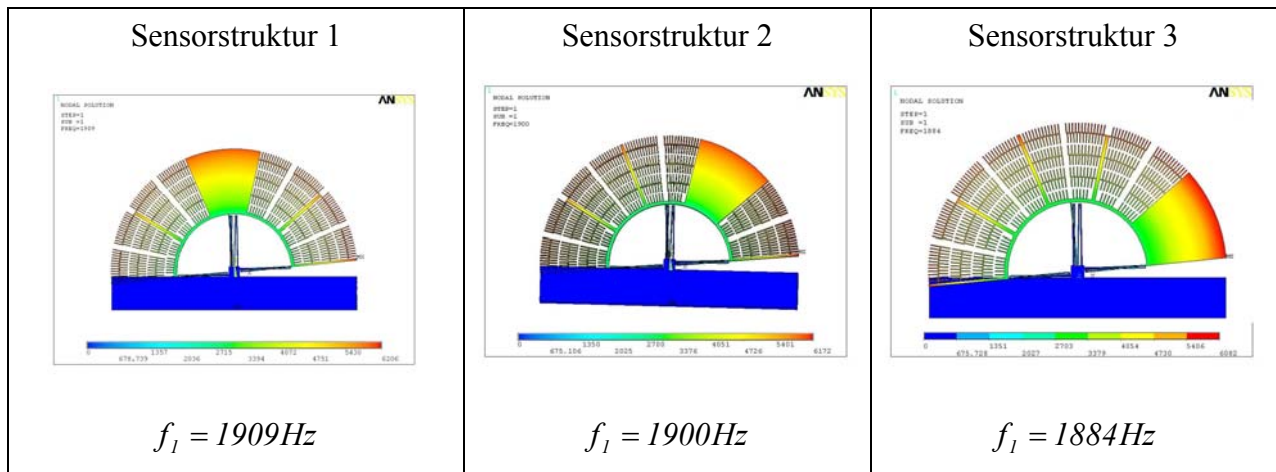


Tabelle 1 Erster Eigenmode und -frequenzen der Einzelsensoren

Als Ansatz für die Analyse des statischen und dynamischen Verhaltens der Einzelsensoren wurde die Bewegungsdifferentialgleichung für rotatorische Systeme benutzt:

$$J\ddot{\varphi} + D_R\dot{\varphi} + K_R\varphi = M_{mech} + M_{elekt}, \quad (1)$$

wobei

J	Trägheitsmoment,
$\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$	Winkel und dessen zeitliche Ableitungen,
D_R	Dämpfung,
K_R	Winkelrichtgröße (Federsteifigkeit für Rotation),
M_{mech}	Moment bedingt durch die Beschleunigung des Sensors,
M_{elekt}	elektrisches Moment bedingt durch die Kapazitätsauswertung.

Das mechanische Moment berechnet sich aus der Beschleunigung auf jeden Sensor. Für das Sensormodell wird der Beschleunigungsanteil berücksichtigt, der senkrecht zu der Strecke DS (Abbildung 6) wirkt.

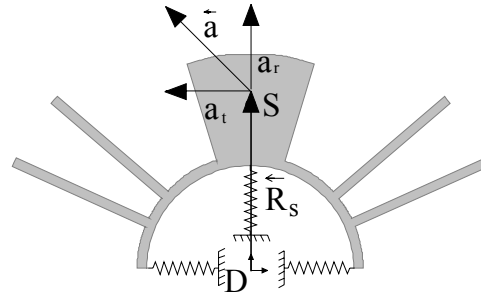


Abbildung 6 Darstellung der Koordinatensysteme für die Berechnung

Die für die Berechnung der Kraft und des Moments benötigten Größen werden mit der FEM-Software ermittelt und sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

	Sensorstruktur 1	Sensorstruktur 2	Sensorstruktur 3
Masse m in μg	49,15	49,28	49,79
Schwerpunkt (S_x, S_y) in μm	(0; 502)	(115; 432)	(191; 329)
Schwerpunktradius in μm	468,90	447,15	381,03
Trägheitsmoment J_{zs}	$1,0461 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\mu\text{m}^2$	$1,1495 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\mu\text{m}^2$	$1,4291 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\mu\text{m}^2$
Trägheitsmoment J_{zd}	$2,1268 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\mu\text{m}^2$	$2,1348 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\mu\text{m}^2$	$2,1520 \cdot 10^{-2} \text{ kg}\mu\text{m}^2$

Tabelle 2 Zusammenfassung der Parameter für die Netzwerksimulation

Für die richtungsabhängige Berechnung der Tangentialbeschleunigung am jeweiligen Sensor ist Gleichung (2) herzuleiten, daraus resultiert das mechanische Moment (Gleichung (3)):

$$a_t = \frac{a_y S_x - a_x S_y}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}}, \text{ mit } \vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ 0 \end{pmatrix} \text{ als Beschleunigung,} \quad (2)$$

$$M_{\text{mech}}(t) = F_{\text{tan}}(t) R = a_t(t) m R. \quad (3)$$

Die Wandlung der Auslenkung der seismischen Masse in eine elektrische Größe erfolgt über das kapazitive Wandlerprinzip. Hierfür sind auf insgesamt sieben Radien ineinander greifende Elektrodenflächen in Form von Kämmen angeordnet. Die Bewegung der Elektrodenflächen führt zu einer fluidischen Dämpfung der Struktur. Eine Abschätzung der Dämpfung liefern die in [10] dargestellten Dämpfungsgleichungen. Für quadratische Platten bei kleinen Abständen gilt Gleichung (4).

$$D(x_0, \Delta x) = \frac{0.423 \eta_{\text{eff}}(x_0) l^4}{(x_0 - \Delta x)^3} \quad (4)$$

D Dämpfung für Bewegung normal zur Plattenebene,

$x_0, \Delta x$ Grundabstand und Änderung,

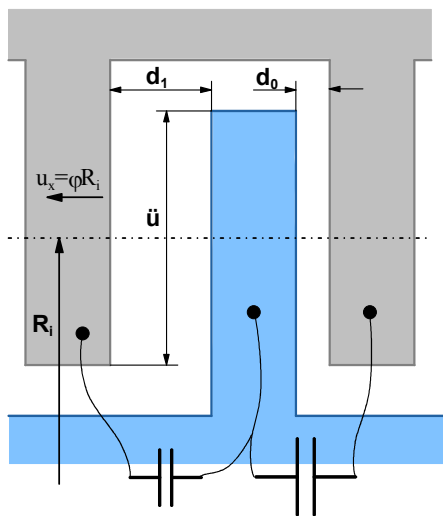
l Plattenlänge,

η_{eff} effektive Viskosität.

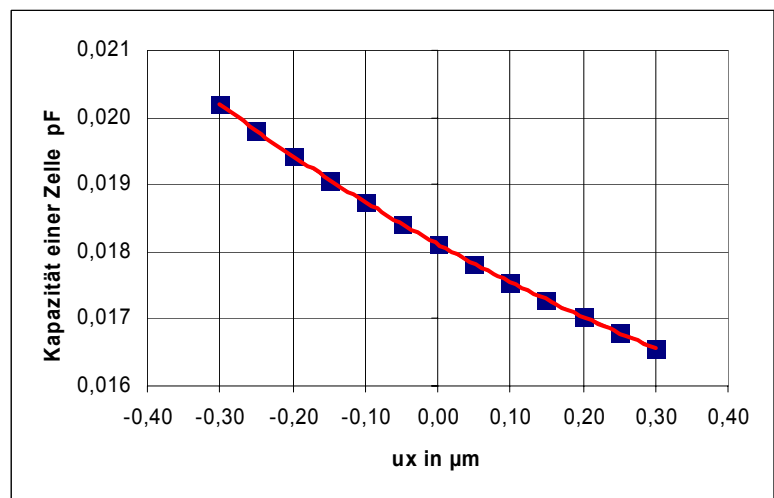
Die benutzte Dämpfungsgleichung gilt nur für linear bewegte Platten, da die erwarteten Winkeländerungen sehr klein sind ($\varphi \ll 1^\circ$) ist eine Linearisierung der Bewegung ausreichend. Die unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten sind im Modell berücksichtigt und addieren sich zu dem in der Gleichung (1) dargestellten Gesamtmoment durch die geschwindigkeitsabhängige Dämpfung. Die Winkelrichtgröße wurde aus Gleichung (5) ermittelt:

$$f_l = \frac{l}{2\pi} \sqrt{\frac{K_R}{J_{zD}}} . \quad (5)$$

Die beschriebenen Kapazitätssegmente setzen sich aus mehreren Kammzellen (Abbildung 7a) zusammen, diese sind auf unterschiedlichen Radien angeordnet. Die Berechnung der Kapazität einer Kammzelle erfolgt über ein entsprechendes 3D-FEM-Modell. Schnittdarstellung und der simulierte Kapazitätsverlauf sind in Abbildung 7 dargestellt. Ein anschließender Polynomfit im Arbeitspunkt und die Implementierung im Netzwerksimulator vervollständigen das Modell des Einzelsensors (Abbildung 8).



a)



b)

Abbildung 7 Kapazität in Abhängigkeit von der Auslenkung

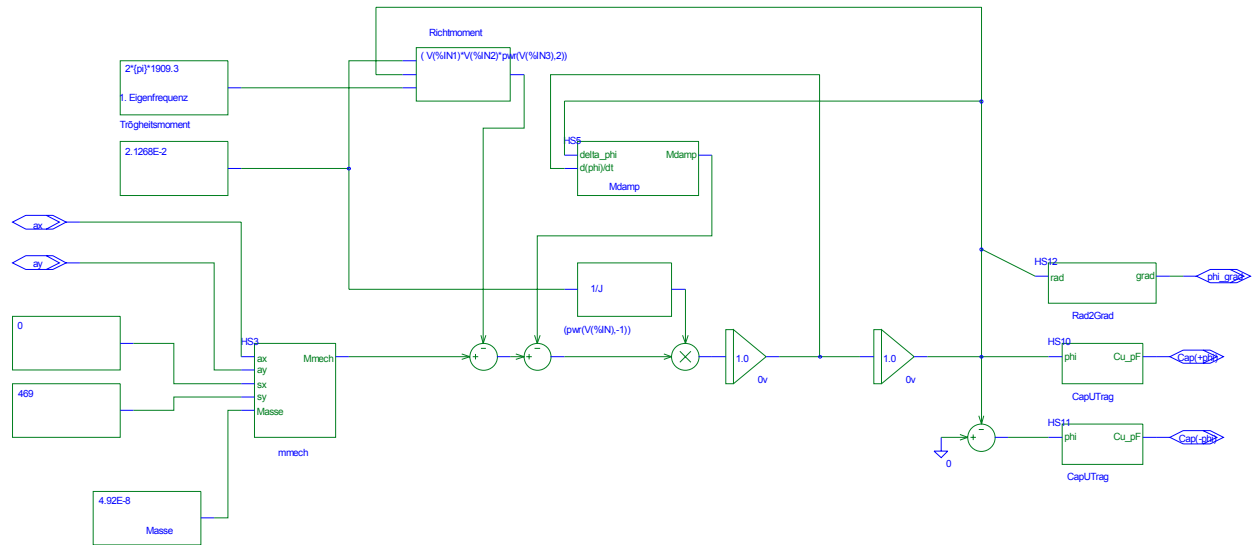


Abbildung 8 Simulationsmodell des Einzelsensors

Für den kompletten Chip (vgl. Abbildung 5) ergeben sich die in Abbildung 9 dargestellten Simulationsergebnisse. Dabei wird der auf den kompletten Sensorchip wirkende Beschleunigungsvektor mit einer Amplitude von $10 \frac{m}{s^2} \approx 1 G$ um 360° ($1 ms = 1^\circ$) in der Chipebene gedreht. Der Auslenkwinkel der seismischen Masse wird in der Grafik dargestellt ($1 mV = 10^{-3}^\circ$). Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass in den Bereichen in denen eine reine zweiachsige Sensorlösung bei der Empfindlichkeit ein Minimum aufweist, eine Verbesserung erzielt wird.

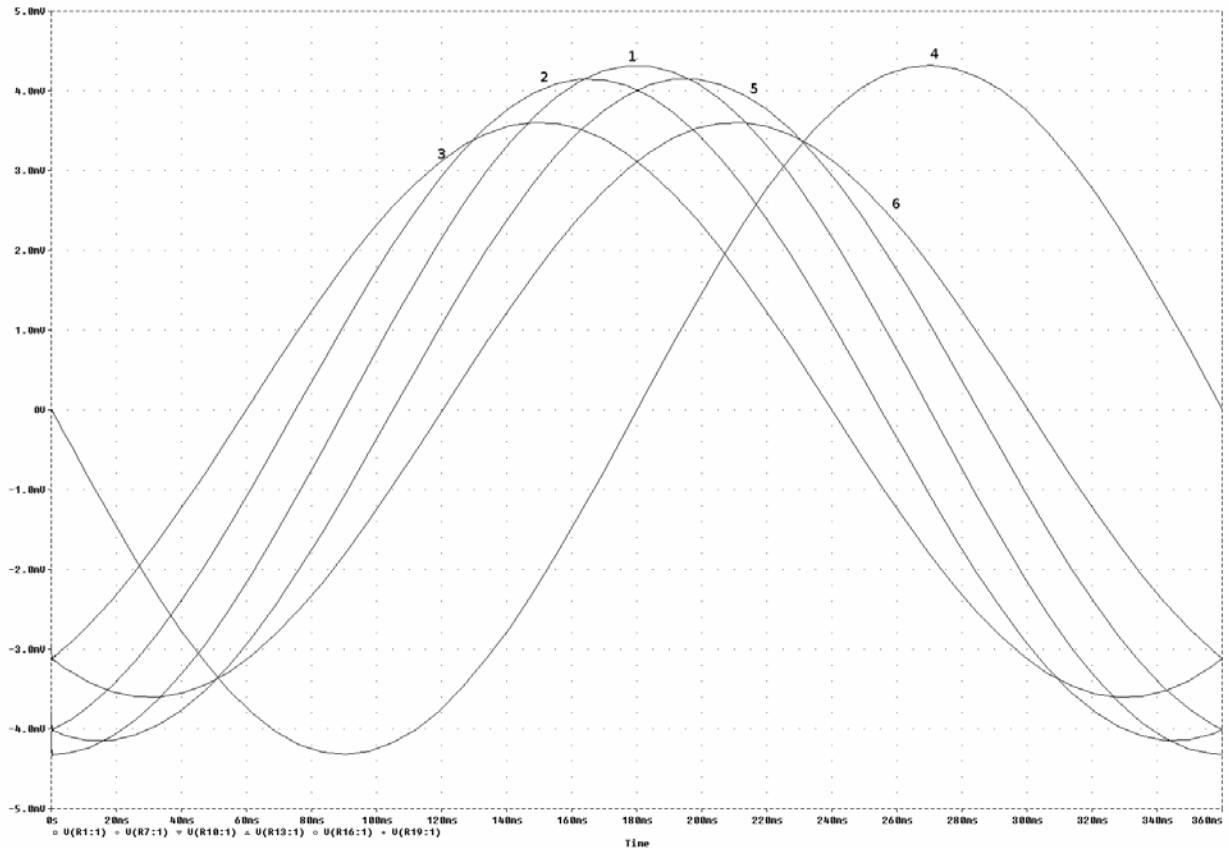


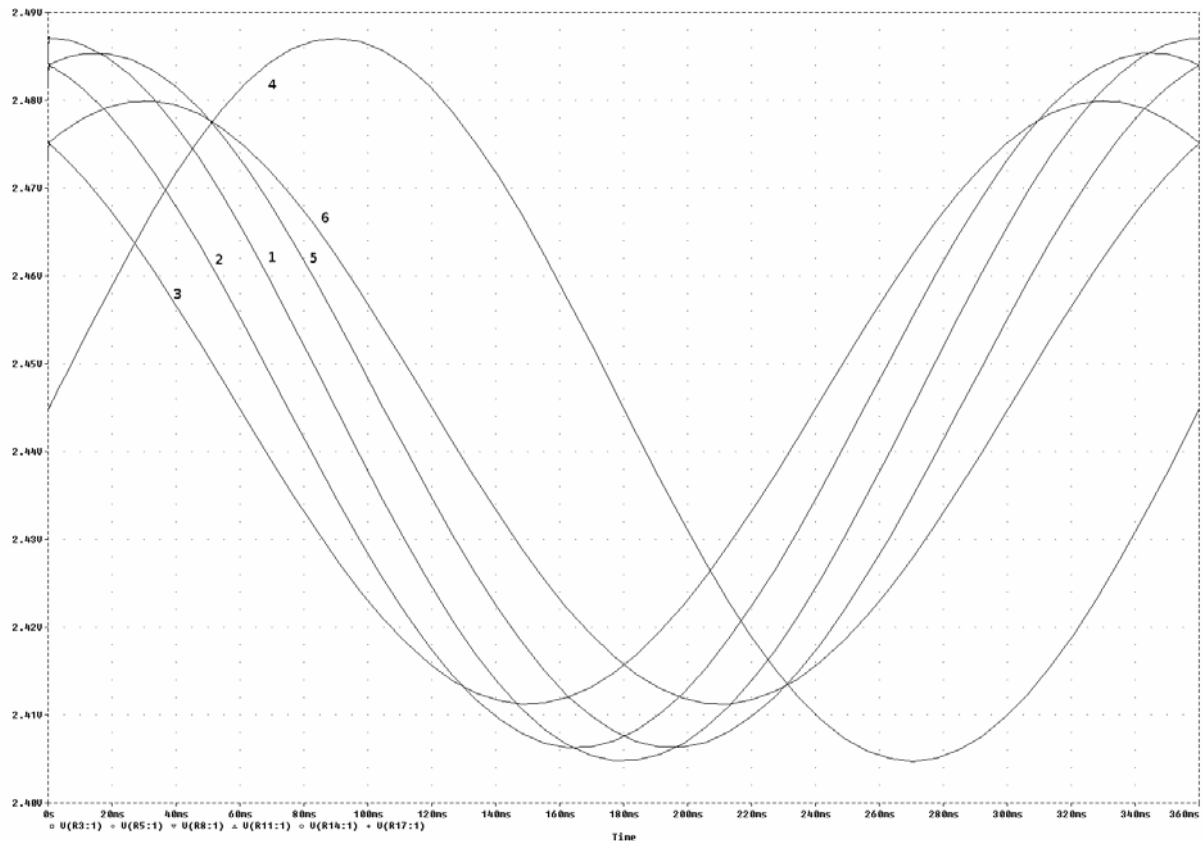
Abbildung 9 Simulationsergebnis für die Auslenkung der Sensoren des Chips

Aus Tabelle 3 ist der Winkel ($\pm 180^\circ$) für die maximale Empfindlichkeit der einzelnen Sensoren dargestellt.

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6
Maximale Empfindlichkeit	0°	162°	148°	90°	18°	33°

Tabelle 3 Ausrichtungswinkel der einwirkenden Beschleunigung für die maximale Empfindlichkeit des Sensors

Mit den berechneten Auslenkungen wird die Kapazitätsänderung (Abbildung 9) eines gesamten Ringsegments ermittelt. Die Grundkapazität ergibt sich zu $2,445 \text{ pF}$ pro Segment.

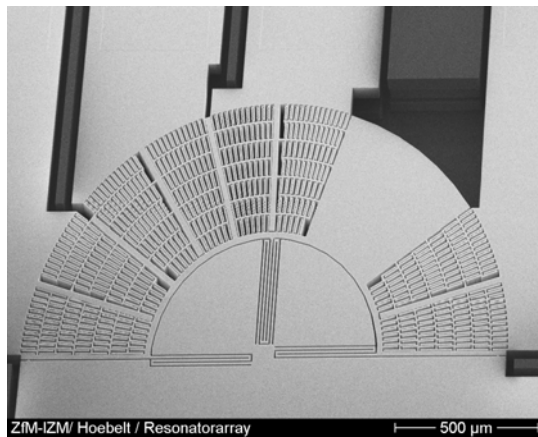


Kapazitätsänderung $1 \text{ V} = 1 \text{ pF}$ / Richtung der Beschleunigung $1 \text{ ms} = 1^\circ$

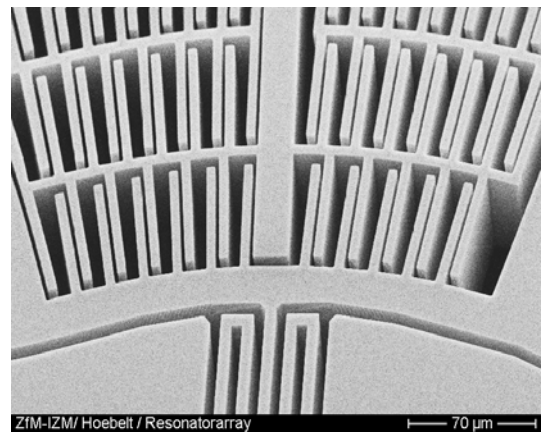
Abbildung 10 Simulationsergebnis für die Kapazitätsänderung eines Segments

TECHNOLOGIE

Die Herstellung der Sensoren erfolgt in einer neuen Silizium-MEMS-Fertigungstechnologie [9], welche ein sehr hohes Aspektverhältnis (bis $30:1$ und Spaltbreiten $\geq 1,5 \mu\text{m}$) ermöglicht. Die gefertigten Sensoren bestehen aus zwei Siliziumwafern (ohne Verkappung). Der Grundwafer wird durch einen Trockenätzschritt derart präpariert, dass unter den später frei beweglichen Strukturen des zweiten Wafers Gräben entstehen. Dieser Wafer wird durch einen Bondprozess auf dem ersten Wafer befestigt und anschließend abgedünnt ($50 \mu\text{m}$). Beide Wafer sind durch das ca. $2 \mu\text{m}$ dicke Siliziumdioxid zwischen den Wafern von einander elektrisch isoliert. Der anschließende Trockenätzschritt durch den gesamten zweiten Wafer strukturiert die beweglichen und festen Sensorstrukturen. In Abbildung 11 a) und b) sind Ausschnitte des gefertigten Sensorchips abgebildet.



a)



b)

Abbildung 11 REM des Sensors 2 a) komplettes Sensorelement, b) Ausschnitt der Elektrodenstrukturen und Federn

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Artikel stellt einen neuen Ansatz für die Messung von Beschleunigungen im Bereich der inertialen Objektverfolgung vor. Die Modellierung und Simulation erfolgt mit einem reduzierten Sensormodell, bestehend aus den sechs Einzelsensoren. Die gekoppelte Simulation der mechanischen und elektrostatischen Komponenten ist die Voraussetzung für die weitere Analyse und die Anpassung der Auswerteschaltung für die Sensoren.

Die vorgestellten Sensoren zeigen in der Simulation das erwartete Verhalten insbesondere der Zuwachs der Empfindlichkeit gegenüber reinen zweiachsigen Sensoren kann gezeigt werden. Mit den verfügbaren gefertigten Sensorstrukturen sind sowohl die messtechnische Charakterisierung und als auch der Aufbau des Sensorsystems möglich.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde innerhalb des Sonderforschungsbereichs 379 „Mikromechanische Sensor- und Aktorarrays“ im Teilprojekt A1 „Komponentenentwurf“ durch die DFG gefördert.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Billep, D.; Dienel, M.: Beschleunigungssensor, Patentanmeldung DE 102004046411.1, 2004.
- [2] Hammond, Jonathan; et al.: Inertial transducer design for manufacturability and performance at Motorola. In: The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducer 2003, IEEE, Boston 2003.
- [3] Oertel, K.: Inertialsensor für kleine Beschleunigungen. In: automotive electronics + systems, 3-4 S.30-35, Hanser, 2004.
- [4] Lemkin, M.; et al.: A three-axis micromachined accelerometer with a CMOS Position-sense Interface and a digital offset-trim electronics. In: Journal of Solid-state circuits, Vol 34 No 4, pp 456-468, IEEE, 1999.
- [5] Reichenbach, Ralf, et al.: Dreiachsiger Beschleunigungssensor in Oberflächenmikromechnik. In Technisches Messen 70 (5/2003) S. 225-232 Oldenburg Verlag, 2003.
- [6] Seidel, H.; et al.: Safety relevant microsystems for automotive applications, in Proc. of Microsystems Conference, Mar. 27-29, Düsseldorf, Germany, 2001.
- [7] Mailly, F.; et al.: Micromachined thermal accelerometer. In: Sensors and Actuators A 103 (2003) pp 359-363, 2003.

- [8] Wolfram, H.; et al.: Modellierung, Reglerentwurf, und Praxistest eines hochdynamischen MEMS-Präzisionsbeschleunigungssensors, In: 5. GMM/ITG/GI-Workshop Multi-Nature Systems, pp 33-40, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (Dresden), 18. Feb. 2005.
- [9] Hiller, K. et al.: Bonding and Deep RIW – a powerful combination for high aspect ratio sensors and actuators. Proceedings of SPIE Photonics West Vol. 5715, San Jose, 2005.
- [10] Mehner, J.: Entwurf in der Mikrosystemtechnik, Dresden University Press, Dresden, 2000.

Autorenangabe(n):

Dipl.-Ing. Marco Dienel

Dr.-Ing. Detlef Billep

Prof. Wolfram Dötzel

TU Chemnitz,

09107 Chemnitz

Tel.: ++49 371 531 3256

Fax: ++49 471 531 3259

E-mail: marco.dienel@etit.tu-chemnitz.de